

УДК 691.327.539.434

Ю.О.КРУСЬ, канд. техн. наук, О.Ю.КРУСЬ

*Національний університет водного господарства та природокористування, м. Рівне*

## **ЗАКОНОМІРНОСТІ ДЕФОРМУВАННЯ Й РУЙНУВАННЯ БЕТОНУ В УМОВАХ ПОВТОРНИХ МАЛОЦИКЛОВИХ НАВАНТАЖУВАНЬ ЦЕНТРАЛЬНИМ СТИСКОМ**

Результати дослідження фізичної природи деформування й руйнування бетону в умовах повторних малоциклових навантажувальних центральним стиском надали можливість отримати математичні залежності, що дозволяють визначати малоциклову втомленість бетону та прогнозувати його напружено-деформований стан на будь-яких стадіях завантажування.

Результаты исследования физической природы деформирования и разрушения бетона в условиях повторных малоцикловых нагружений центральным сжатием предоставили возможность получить математические зависимости, позволяющие определять малоцикловую усталость бетона и прогнозировать его напряжённо-деформированное состояние на любых стадиях нагружения.

Results of research of the physical nature of a concrete deforming and destruction in conditions of repeated low cyclic loadings the central compression have given possibility to receive the mathematical dependences, allowing to define low cyclic fatigue of concrete and forecasting its stressed-strained state at any stages of loading.

*Ключові слова:* повторні малоциклові навантаження, бетон, поздовжнє й поперечне деформування, малоциклова втомленість, деформативні характеристики.

Численні спостереження та експериментальні дослідження засвідчують, що в реальних умовах переважна більшість зовнішніх навантажень випадково чи періодично повторюються з чергуванням завантажувальних і розвантажувальних, тобто мають змінний характер як у часі, так і за своїми значеннями. Серед змінних силових впливів вирізняють так звані *малоциклові навантаження* з невеликою кількістю повторювань за гарантований термін служби будівлі або споруди у десятки, сотні, а деколи й тисячі разів (у всіх випадках набагато менше, ніж регламентовані будівельними нормами для багатоциклових навантажень  $2 \times 10^6$  циклів) [1]. До таких можуть бути віднесені як навантаження природного походження (снігові; вітрові; сейсмічні; хвильові; льодові при прориві заток; навантаження, що спричинені деформаціями основи та ін.), так і деякі технологічні (у силосах елеваторів для збереження сипких матеріалів; на перекриття від ваги людей і ремонтних матеріалів у зонах обслуговування й ремонту обладнання; від ваги складованих матеріалів; тиск від гідравлічного удару в період нормальної експлуатації тощо).

Дія повторних малоциклових навантажень, спричиняючи специфічні особливості деформування та руйнування нелінійно деформованих матеріалів і, відповідно, виготовлених із них конструкцій, може призведе-

сти до неочікуваних і тяжких наслідків, аж до аварій вірно запроектованих згідно з чинними будівельними нормами будівель і споруд.

Раніше [2] були опубліковані результати вивчення особливостей поздовжнього й поперечного деформування та механізму руйнування центрально стисненого бетону при дії повторних малоциклових навантажень високих рівнів, що базувались на даних власних експериментальних досліджень [3] малоциклової втомленості крупнозернистого бетону КЗБ на традиційних щебеневих заповнювачах. У представленій роботі зроблене намагання математично змодельовати виявлені процеси з метою можливості їхнього врахування при розрахунку бетонних і залізобетонних конструкцій, що експлуатуються в умовах розглядуваних силових впливів.

Задля більшої наочності, зручності при технічному опрацюванні та подальшому практичному застосуванні одержані експериментальні дані, що могли б засвідчити вплив повторних малоциклових навантажувальних на якісний та кількісний характер деформування й руйнування досліджуваного бетону, представлені на рис.1, 2 графіками поциклової (тобто залежної від біжучої кількості циклів навантажування  $n$ ) зміни його міцності та основних деформативних параметрів у вигляді відносних величин  $R_{b,cyc}/R_b$ ,  $E_{b0,l(tr);n}/E_{b0,l(tr);n=1}$ ,  $\lambda_{bR,l(tr);n}/\lambda_{bR,l(tr);n=1}$ ,  $\varepsilon_{bR,l(tr);n}/\varepsilon_{bR,l(tr);n=1}$ ,  $\sum \varepsilon_{b,pl,l(tr);n}/\varepsilon_{b,pl,l(tr);n=1}$  (тут для розрізнення поздовжнього й поперечного напрямків деформування в позначеннях застосовуємо нижні індекси відповідно “ $l$ ” і “ $tr$ ”). Інакше такі графічні залежності називають *циклічними діаграмами деформування* [1, 4].

Математичне описання циклїчних діаграм деформування бетону здійснювали співвідношеннями такого типу:

- для малоциклової втомленості (міцності) при стиску  $R_{b,cyc}/R_b$  (див. формулу (2) і рис.3 у публікації [3])

$$\eta_{b,cyc} = R_{b,cyc}/R_b = 1 - a_{1,l(tr)} \sqrt[n]{n_{cyc} - 1} \sqrt[n]{n_{cyc} + b_{1,l(tr)}}; \quad (1)$$

- для початкового модуля пружності при стиску  $E_{b0,l(tr);n}/E_{b0,l(tr);n=1}$

$$\frac{E_{b0,l(tr);n}}{E_{b0,l(tr);n=1}} = f \sqrt[n]{n} = 1 - a_{2,l(tr)} \frac{n-1}{n+b_{2,l(tr)}}; \quad (2)$$

- для граничного коефіцієнта пластичності при стиску

$$\frac{\lambda_{bR,l(tr);n}}{\lambda_{bR,l(tr);n=1}} = f \sqrt[n]{n} = n \cdot \left( 1 - a_{3,l(tr)} \frac{n-1}{n-b_{3,l(tr)}} \right); \quad (3)$$

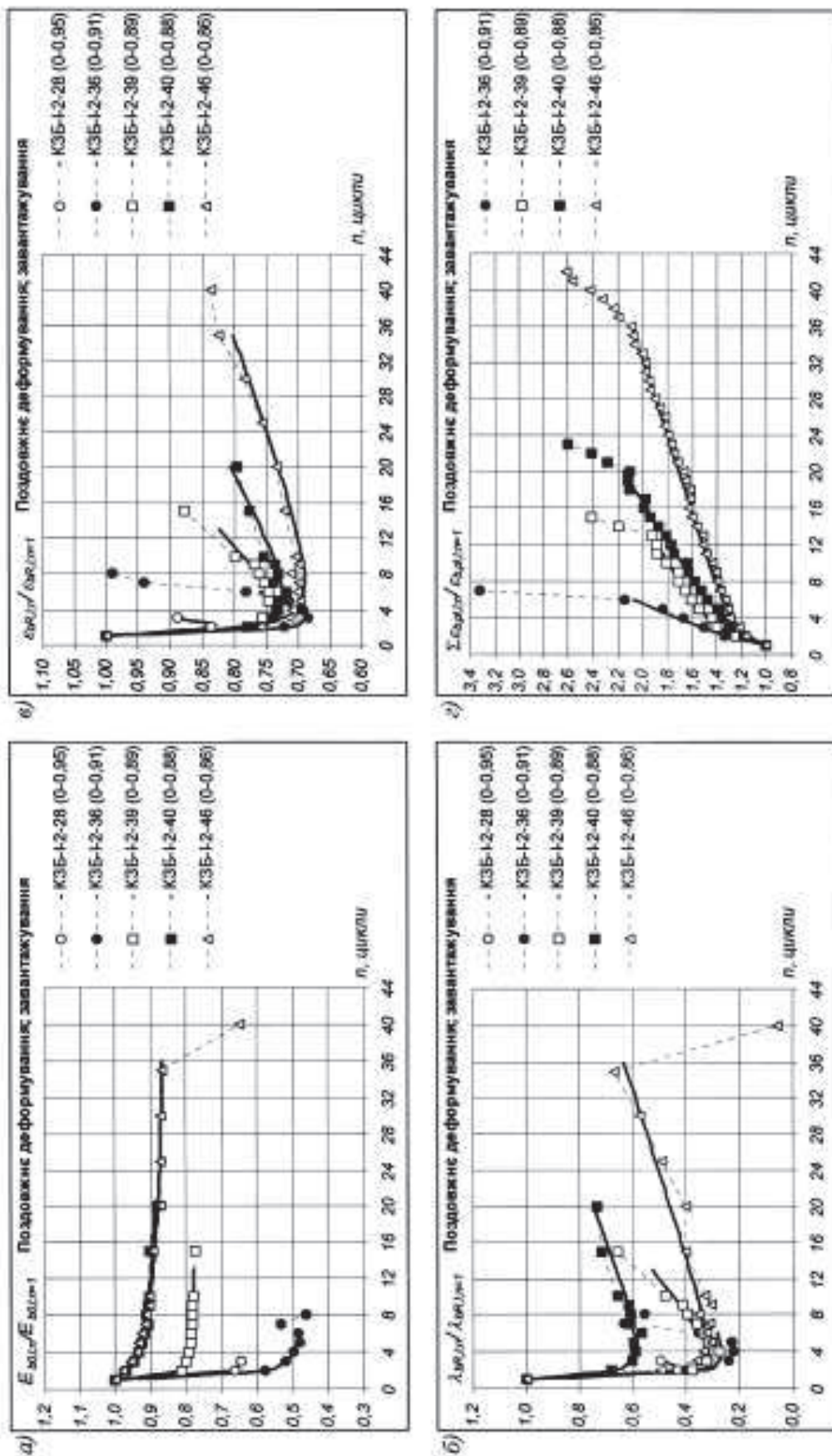


Рис.1 – Графічна ілюстрація поциклової зміни характеристик нелінійного позовжнього деформування крупнозернистого бетону КЗБ при дії повторних малоциклових стискаючих навантажень високих рівнів (циклічні діаграми позовжнього деформування крупнозернистого бетону КЗБ)



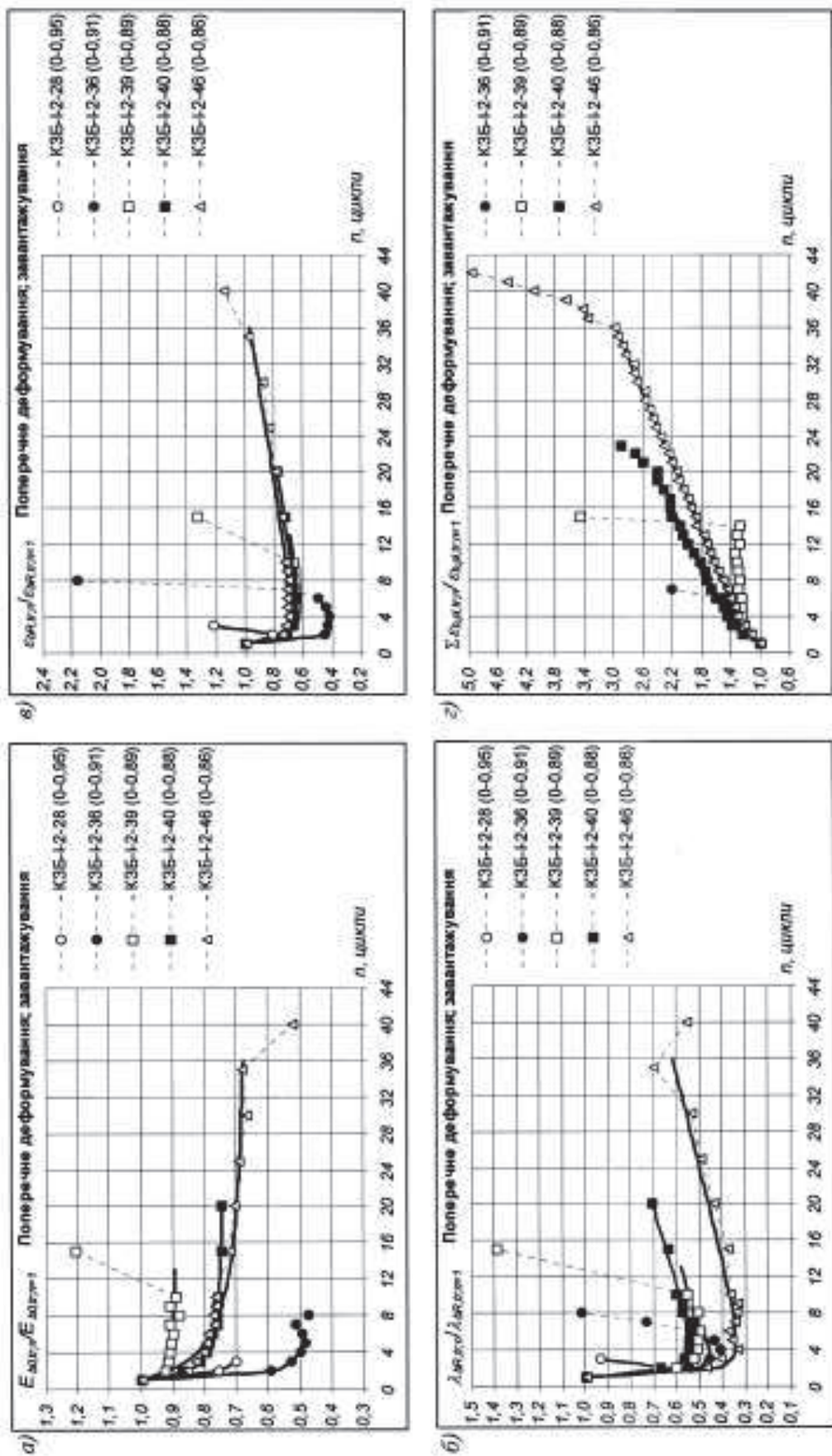


Рис.2 – Графічна ілюстрація поциклової зміни характеристик нелінійного поперечного деформування крупнозернистого бетону КЗБ при дії повторних малоциклових стискаючих навантажень високих рівнів (циклічні діаграми поперечного деформування крупнозернистого бетону КЗБ)

- для граничної деформації стиску  $\varepsilon_{bR,l(tr);n} / \varepsilon_{bR,l(tr);n=1}$

$$\frac{\varepsilon_{bR,l(tr);n}}{\varepsilon_{bR,l(tr);n=1}} = f_{\text{к}} \cdot n \cdot \left( 1 - a_{4,l(tr)} \frac{n-1}{n-b_{4,l(tr)}} \right); \quad (4)$$

- для сумарної залишкової деформації стиску  $\sum \varepsilon_{b,pl,l(tr);n} / \varepsilon_{b,pl,l(tr);n=1}$

$$\frac{\sum \varepsilon_{b,pl,l(tr);n}}{\varepsilon_{b,pl,l(tr);n=1}} = f_{\text{к}} \cdot n \cdot \left( 1 - a_{5,l(tr)} \frac{n-1}{n+b_{5,l(tr)}} \right), \quad (5)$$

де  $a_{1...5,l(tr)}$  і  $b_{1...5,l(tr)}$  – сталі емпіричні коефіцієнти, які визначаються з умов мінімуму квадратичних абсолютних відхилень дослідних точок (*exp*) від відповідних теоретичних кривих (*calc*).

Числові значення сталих емпіричних коефіцієнтів залежностей (1)-(5) та статистики нормальних варіаційних рядів співвідношень  $Y_{l,\text{к}}^{\text{exp}} / Y_{l,\text{к}}^{\text{calc}}$  при поздовжньому й поперечному деформуваннях бетону (тут  $Y_{l(tr);n}$  – будь-який із розглядуваних параметрів) наведено в табл.1.

Застосовуючи відомий закон  $\sigma_b = f(\varepsilon_b)$ , що описує деформування бетону при одноразовому завантажуванні до руйнування (формула (26) у публікації [5]),

$$\sigma_b = \frac{E_{b0} \varepsilon_b}{1 + \lambda_{bR} E_{b0} \varepsilon_b / R_b} = \frac{E_{b0}}{1/\varepsilon_b + \lambda_{bR} E_{b0} / R_b}, \quad (6)$$

адекватність отриманих залежностей (1)-(5) перевіряли, визначивши теоретичні значення сумарних максимальних поздовжніх і поперечних відносних деформацій  $\sum \varepsilon_{b,max,l,\text{к}}^{\text{calc}}$  на  $n$ -х циклах завантажування з виразів:

на 1-му циклі завантажування (тобто при  $n = 1$ )

$$\varepsilon_{b,max,l,\text{к}}^{\text{н}} = \frac{\sigma_{b,max}}{E_{b0,l,\text{к}}^{\text{н}} \left( 1 - \lambda_{bR,l,\text{к}}^{\text{н}} \frac{\sigma_{b,max}}{R_b} \right)}; \quad (7)$$

на подальших  $n$ -х циклах завантажування

$$\sum_{n=2}^n \varepsilon_{b,max,l,\text{к}}^{\text{н}} = \sum_{m=1}^{m=n-1} \varepsilon_{b,pl,l,\text{к}}^{\text{н}} + \varepsilon_{b,max,l,\text{к}}^{\text{н}}, \quad (8)$$

Таблиця 1 – Числові значення сталей емпіричних коефіцієнтів і статистичних характеристик залежностей (1)-(5)

| Шифр<br>проби          | Досліджувані<br>параметр                     | Подовжнє деформування ("L") |        |                            |        |        |       | Поперечне деформування ("r") |       |                            |        |        |        |      |      |
|------------------------|----------------------------------------------|-----------------------------|--------|----------------------------|--------|--------|-------|------------------------------|-------|----------------------------|--------|--------|--------|------|------|
|                        |                                              | Сталі<br>коефіцієнти        |        | Статистичні характеристики |        |        |       | Сталі<br>коефіцієнти         |       | Статистичні характеристики |        |        |        |      |      |
|                        |                                              | a                           | b      | n, шт.                     | M      | σ      | V, %  | P, %                         | a     | b                          | n, шт. | M      | σ      | V, % | P, % |
| КЗБ-1-2-28<br>[0-0,95] | $R_{b,exp}/R_b$                              | 0,160                       | 4,064  | 16                         | 0,9926 | 0,0311 | 3,11  | 0,78                         | 0,160 | 4,064                      | 16     | 0,9926 | 0,0311 | 3,11 | 0,78 |
|                        | $E_{b0}(r)/E_{b0}(r)_{exp}$                  | 0,378                       | -0,873 | 2                          | 1,0000 | 0,0000 | 0,00  | 0,00                         | 0,382 | -0,454                     | 2      | 1,0000 | 0,0000 | 0,00 | 0,00 |
|                        | $\lambda_{b0}(r)/\lambda_{b0}(r)_{exp}$      | 0,891                       | 0,862  | 2                          | 1,0000 | 0,0000 | 0,00  | 0,00                         | 0,723 | 0,898                      | 2      | 1,0000 | 0,0000 | 0,00 | 0,00 |
|                        | $\sigma_{b0}(r)/\sigma_{b0}(r)_{exp}$        | 0,890                       | 0,473  | 2                          | 1,0000 | 0,0000 | 0,00  | 0,00                         | 0,595 | 1,001                      | 2      | 1,0000 | 0,0000 | 0,00 | 0,00 |
|                        | $\Sigma \sigma_{b0}(r)/\sigma_{b0}(r)_{exp}$ | ---                         | ---    | ---                        | ---    | ---    | ---   | ---                          | ---   | ---                        | ---    | ---    | ---    | ---  | ---  |
| КЗБ-1-2-36<br>[0-0,91] | $R_{b,exp}/R_b$                              | 0,160                       | 4,064  | 16                         | 0,9926 | 0,0311 | 3,11  | 0,78                         | 0,160 | 4,064                      | 16     | 0,9926 | 0,0311 | 3,11 | 0,78 |
|                        | $E_{b0}(r)/E_{b0}(r)_{exp}$                  | 0,549                       | -0,707 | 5                          | 1,0005 | 0,0091 | 0,91  | 0,41                         | 0,547 | -0,688                     | 5      | 1,0010 | 0,0161 | 1,61 | 0,72 |
|                        | $\lambda_{b0}(r)/\lambda_{b0}(r)_{exp}$      | 0,986                       | 0,825  | 5                          | 0,9931 | 0,2245 | 22,45 | 10,04                        | 0,977 | 0,687                      | 5      | 0,9972 | 0,0879 | 8,79 | 3,93 |
|                        | $\sigma_{b0}(r)/\sigma_{b0}(r)_{exp}$        | 0,958                       | 0,515  | 5                          | 0,9994 | 0,0200 | 2,00  | 0,89                         | 0,964 | 0,760                      | 5      | 1,0000 | 0,0235 | 2,35 | 1,05 |
|                        | $\Sigma \sigma_{b0}(r)/\sigma_{b0}(r)_{exp}$ | 0,842                       | 0,428  | 5                          | 0,9976 | 0,0320 | 3,20  | 1,43                         | 0,931 | 0,164                      | 5      | 0,9999 | 0,0110 | 1,10 | 0,49 |
| КЗБ-1-2-39<br>[0-0,89] | $R_{b,exp}/R_b$                              | 0,160                       | 4,064  | 16                         | 0,9926 | 0,0311 | 3,11  | 0,78                         | 0,160 | 4,064                      | 16     | 0,9926 | 0,0311 | 3,11 | 0,78 |
|                        | $E_{b0}(r)/E_{b0}(r)_{exp}$                  | 0,227                       | -0,701 | 9                          | 0,9992 | 0,0041 | 0,41  | 0,13                         | 0,112 | -0,385                     | 9      | 0,9990 | 0,0094 | 0,94 | 0,31 |
|                        | $\lambda_{b0}(r)/\lambda_{b0}(r)_{exp}$      | 0,973                       | 0,830  | 9                          | 1,0004 | 0,0729 | 7,29  | 2,43                         | 0,987 | 0,601                      | 9      | 0,9991 | 0,0256 | 2,56 | 0,85 |
|                        | $\sigma_{b0}(r)/\sigma_{b0}(r)_{exp}$        | 0,985                       | 0,379  | 9                          | 1,0001 | 0,0091 | 0,91  | 0,30                         | 0,991 | 0,442                      | 9      | 1,0001 | 0,0048 | 0,48 | 0,16 |
|                        | $\Sigma \sigma_{b0}(r)/\sigma_{b0}(r)_{exp}$ | 0,963                       | 0,569  | 12                         | 0,9997 | 0,0131 | 1,31  | 0,38                         | 1,000 | 0,349                      | 12     | 0,9997 | 0,0131 | 1,31 | 0,38 |
| КЗБ-1-2-40<br>[0-0,88] | $R_{b,exp}/R_b$                              | 0,160                       | 4,064  | 16                         | 0,9926 | 0,0311 | 3,11  | 0,78                         | 0,160 | 4,064                      | 16     | 0,9926 | 0,0311 | 3,11 | 0,78 |
|                        | $E_{b0}(r)/E_{b0}(r)_{exp}$                  | 0,129                       | 2,081  | 11                         | 0,9998 | 0,0045 | 0,45  | 0,13                         | 0,268 | -0,096                     | 11     | 1,0006 | 0,0052 | 0,52 | 0,16 |
|                        | $\lambda_{b0}(r)/\lambda_{b0}(r)_{exp}$      | 0,987                       | 0,522  | 11                         | 0,9994 | 0,0269 | 2,69  | 0,81                         | 0,987 | 0,558                      | 11     | 0,9982 | 0,0317 | 3,17 | 0,95 |
|                        | $\sigma_{b0}(r)/\sigma_{b0}(r)_{exp}$        | 0,992                       | 0,359  | 11                         | 1,0007 | 0,0119 | 1,19  | 0,36                         | 0,989 | 0,444                      | 11     | 1,0007 | 0,0145 | 1,45 | 0,44 |
|                        | $\Sigma \sigma_{b0}(r)/\sigma_{b0}(r)_{exp}$ | 0,955                       | 0,336  | 19                         | 0,9997 | 0,0130 | 1,30  | 0,30                         | 0,945 | 0,434                      | 19     | 0,9996 | 0,0153 | 1,53 | 0,35 |
| КЗБ-1-2-46<br>[0-0,86] | $R_{b,exp}/R_b$                              | 0,160                       | 4,064  | 16                         | 0,9926 | 0,0311 | 3,11  | 0,78                         | 0,160 | 4,064                      | 16     | 0,9926 | 0,0311 | 3,11 | 0,78 |
|                        | $E_{b0}(r)/E_{b0}(r)_{exp}$                  | 0,155                       | 4,311  | 14                         | 0,9997 | 0,0035 | 0,35  | 0,09                         | 0,349 | 2,005                      | 14     | 0,9981 | 0,0275 | 2,75 | 0,73 |
|                        | $\lambda_{b0}(r)/\lambda_{b0}(r)_{exp}$      | 0,989                       | 0,767  | 14                         | 0,9991 | 0,0960 | 9,60  | 2,57                         | 0,990 | 0,746                      | 14     | 1,0002 | 0,0830 | 8,30 | 2,22 |
|                        | $\sigma_{b0}(r)/\sigma_{b0}(r)_{exp}$        | 0,995                       | 0,377  | 14                         | 1,0008 | 0,0124 | 1,24  | 0,33                         | 0,990 | 0,396                      | 14     | 1,0005 | 0,0182 | 1,82 | 0,49 |
|                        | $\Sigma \sigma_{b0}(r)/\sigma_{b0}(r)_{exp}$ | 0,977                       | 0,298  | 35                         | 0,9994 | 0,0107 | 1,07  | 0,18                         | 0,949 | 0,196                      | 35     | 1,0001 | 0,0079 | 0,79 | 0,13 |

Примітка. Цю таблицю дивитись разом з рис. 1 і 2

Примітка. Цю таблицю дивитись разом з рис. 1 і 2



де

$$\varepsilon_{b,max,l} = \frac{\sigma_{b,max}}{E_{b0,l} \left( 1 - \lambda_{bR,l} \frac{\sigma_{b,max}}{R_{b,cyc}} \right)} \quad (9)$$

(тут  $n$  і  $m = n-1$  – номери конкретних відповідно біжучого та йому передуючого (тобто на 1 менше) циклів завантажування (завантажувального циклу);  $R_{b,cyc}$  – напруження, яке відповідає малоциклової втомленості бетону й визначається за формулою (1);  $E_{b0,l}$ ,  $\lambda_{bR,l}$  і  $\Sigma \varepsilon_{b,pl,l}$  – основні деформативні параметри бетону при повторних малоциклових завантажуваннях, які визначають із виразів відповідно (2), (3) і (5)), та порівнявши їх із зафіксованими в експериментах відповідними дослідними даними  $\Sigma \varepsilon_{b,max,l}^{exp}$ . Результати перевірки представлені в табл.2 і на рис.3 та засвідчують про цілком прийнятні статистичні характеристики по нормальних варіаційних рядах співвідношень  $\Sigma \varepsilon_{b,max,l}^{exp} / \Sigma \varepsilon_{b,max,l}^{calc}$ . Коефіцієнти варіації й показники точності коливаються в таких межах: для співвідношень  $\Sigma \varepsilon_{b,max,l}^{exp} / \Sigma \varepsilon_{b,max,l}^{calc}$  –  $V=0,70...3,15\%$  і  $P=0,16...1,29\%$ ; для співвідношень  $\Sigma \varepsilon_{b,max,tr}^{exp} / \Sigma \varepsilon_{b,max,tr}^{calc}$  –  $V=1,09...3,10\%$  і  $P=0,3...0,8\%$ .

Таблиця 2 – Статистики по нормальних варіаційних рядах співвідношень

$\Sigma \varepsilon_{b,max,l}^{exp} / \Sigma \varepsilon_{b,max,l}^{calc}$  при поздовжньому (“l”) й поперечному (“tr”) деформуваннях крупнозернистого бетону КЗБ в умовах повторних малоциклових навантажувальних дослідних призмових зразків центральним стиском до руйнування

| Шифр призми            | Статистики по нормальних варіаційних рядах співвідношень                   |         |              |      |      |                               |         |              |      |      |
|------------------------|----------------------------------------------------------------------------|---------|--------------|------|------|-------------------------------|---------|--------------|------|------|
|                        | $\Sigma \varepsilon_{b,max,l}^{exp} / \Sigma \varepsilon_{b,max,l}^{calc}$ |         |              |      |      |                               |         |              |      |      |
|                        | поздовжнє деформування (“l”)                                               |         |              |      |      | поперечне деформування (“tr”) |         |              |      |      |
|                        | n, шт.                                                                     | M       | $\sigma$ , % | V, % | P, % | n, шт.                        | M       | $\sigma$ , % | V, % | P, % |
| КЗБ-I-2-36<br>[0-0,91] | 6                                                                          | 1,00001 | 0,03150      | 3,15 | 1,29 | 6                             | 0,99876 | 0,01953      | 1,95 | 0,80 |
| КЗБ-I-2-39<br>[0-0,89] | 13                                                                         | 1,00149 | 0,01085      | 1,08 | 0,30 | 13                            | 0,99681 | 0,01086      | 1,09 | 0,30 |
| КЗБ-I-2-40<br>[0-0,88] | 20                                                                         | 1,00154 | 0,00699      | 0,70 | 0,16 | 20                            | 0,99341 | 0,01325      | 1,33 | 0,30 |
| КЗБ-I-2-46<br>[0-0,86] | 36                                                                         | 1,00739 | 0,02141      | 2,14 | 0,36 | 36                            | 1,00290 | 0,03100      | 3,10 | 0,52 |

Примітка. До опрацювання для конкретної призми брали лише ті дослідні точки, що відповідають сталому деформуванню бетону на стадіях I і II (рис.4 в публікації [2]).

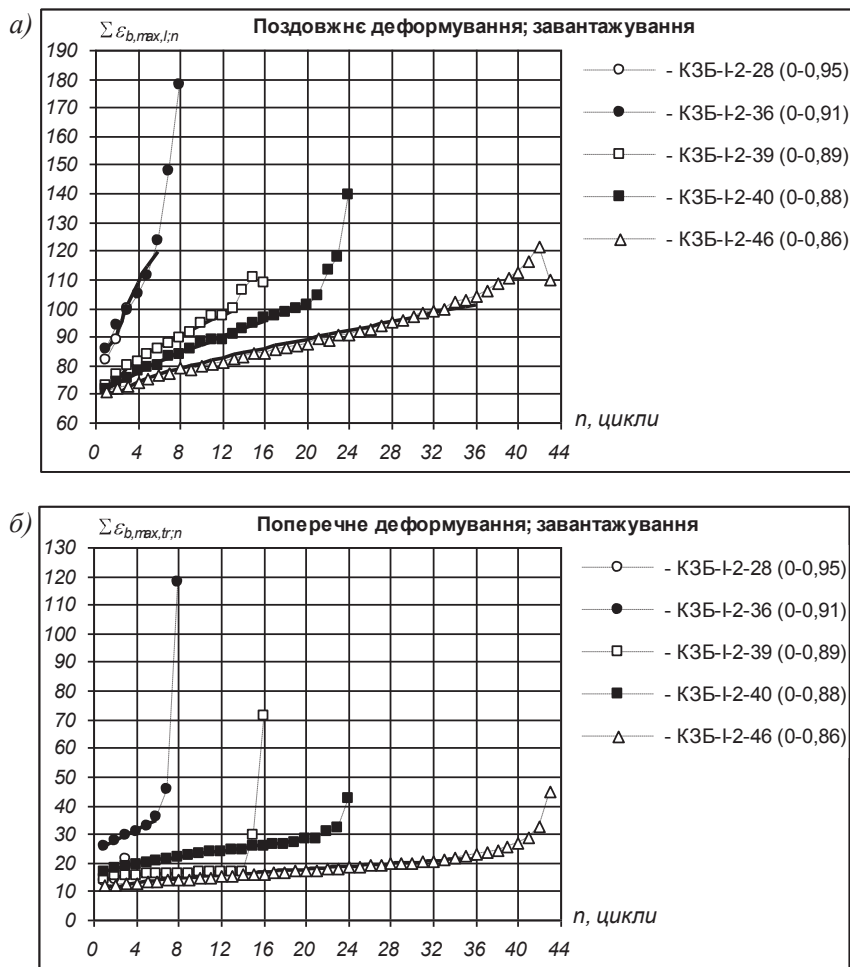


Рис.3 – Графічна ілюстрація послідовної зміни від циклу до циклу сумарних максимальних відносних деформацій  $\sum \varepsilon_{b,max}$  при поздовжньому ("l") й поперечному ("tr") деформуваннях крупнозернистого бетону КЗБ при дії повторних малоциклових стискаючих навантажувальних високих рівнів (циклічні діаграми поздовжнього й поперечного деформувань бетонів)

1.Бабич Є.М., Крусь Ю.О. Бетонні та залізобетонні елементи в умовах малоциклових навантажень. – Рівне: РДТУ, 1999. – 119 с.

2.Крусь Ю.О., Крусь О.Ю. Деформування й руйнування бетону в умовах повторних малоциклових навантажувальних // Будівельні конструкції: Міжвід. наук.-техн. зб. – К.: НДІБК, 2011. – Вип. 74. Кн. 1. – С.629-639.

3.Крусь Ю.А. Малоцикловая усталость бетона при сжатии и растяжении в феноменологической постановке // Бетон и железобетон в Украине. – 2009. – № 3(49). – С.8-17.

4.Крусь Ю.О. Класичні уявлення про роботу пружно-пластичних матеріалів в умовах циклічних навантажувальних // Діагностика, довговічність та реконструкція мостів: Зб. наук. пр. – Львів: Каменяр, 2007. – Вип. 9. – С.56-79.

5.Бабич Є.М., Крусь Ю.О. До питання побудови діаграми деформування бетону та визначення коефіцієнта повноти епюри напружень // Ресурсоекономічні матеріали, конструкції, будівлі та споруди: Зб. наук. пр. – Рівне: РДТУ, 2001. – Вип. 6. – С. 94-104.

Отримано 27.04.2012